

1.6 μm 直接検波 DIAL による高精度 CO₂ 観測

The high accuracy observations of 1.6 μm CO₂-DIAL by the direct detection method

長澤親生、阿保 真、柴田泰邦、茂木洋二（首都大学東京システムデザイン研究科）
永井智広（気象研）、塚本 誠、誉田高行（英弘精機）

C. Nagasawa¹, M. Abo¹, Y. Shibata¹, Y. Motegi¹, T. Nagai²,
M. Tsukamoto³ and T. Honda³

¹Tokyo Metropolitan University, ²Meteorological Research Institute,
³Eco Instruments Corporation

ABSTRACT

The 1.6 μm differential absorption lidar (DIAL) technique for high accurate measurements of vertical carbon dioxide (CO₂) concentration profiles in the atmosphere has been developed at Tokyo Metropolitan University. The 1.6 μm DIAL system consists of the OPG (Optical Parametric Generator) transmitter that is excited by the LD pumped Nd:YAG laser with high repetition rate (500Hz) and the receiving optics that included the multi-telescope system, the near-infrared photomultiplier tubes with high quantum efficiency operating at the photon counting and analog modes. Computer simulation result shows that the fast switching time (2ms) of on/off wavelengths can neglect the influence of motions of atmospheric aerosol layers.

1. はじめに

大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度の高度分布観測は、航空機観測や気球観測で可能であるが、空間分布および時系列変動の観測には、差分吸収ライダー (DIAL) に大きな期待が寄せられてきた。我々は、2007年に波長 1.6 μm のレーザを用いた直接検波方式の CO₂-DIAL の初期実験に成功した (Sakaizawa et al. 2009)。それ以後、より測定精度向上をめざして、多面にわたる改良を加えてきた。今回は、(1) 地表付近から対流圏上部までの CO₂ 観測精度を向上させるために、光子計数法 2 系統、アナログ法 1 系統を駆使して、広いダイナミックレンジを確保したこと、(2) DIAL における on/off の切り替え時間と大気中のエアロゾルの変動に起因する誤差の検討結果について報告する。

2. DIAL システムの概要

対流圏上部までの CO₂ 観測を可能にするためには波長 1.6 μm 帯で高出力の同調可能なパルスレーザが求められる。我々は 1.6 μm 帯の送信レーザ候補として擬似位相整合 (QPM: Quasi Phase Matching) デバイスである PPMgLT (Periodically poled Mg-doped LiTaO₃) を用いた OPG (Optical Parametric Generator) で送信出力を得ている。OPG は共振器を持たないため容易にシード光による制御が可能である。OPG の波長 1.572 μm のシグナル光を DIAL の送信レーザ光とするためにはシグナル光を CO₂ 吸収スペクトルの中心波長へ精度よく同調させることが重要である。シグナル光の波長制御のためには 2 本のシード光が使われている。先ず CW Nd:YAG レーザの第 2 高調波である波長 532 nm 近傍のヨウ素吸収線を

利用して波長安定化した波長 1.06 μm の Nd:YAG レーザをパルス Nd:YAG レーザのシード光として用いる。

OPG にはもう一つのシード光として CO₂ セルを使って吸収線のピークに同調した on 波長の DFB レーザを注入することにより絶対精度 0.15 pm (40 MHz) でパルス光を同調させる。OPG のポンプ用のパルス Nd:YAG レーザの出力は最大 100 mJ/pulse 繰返し周波数は 500 Hz, ビームは TEM₀₀ モードである。on 波長と off 波長のシード光は、ファイバスイッチにより 1 ショット (2ms) ごとに切り替えている。また OPG の後に出力を増幅させるために増幅段である OPA (Optical parametric amplifier) を加えている。この結果波長 1572.018nm で最大出力 20mJ/pulse が得られた。Fig. 1 にシステム概要図を示す。

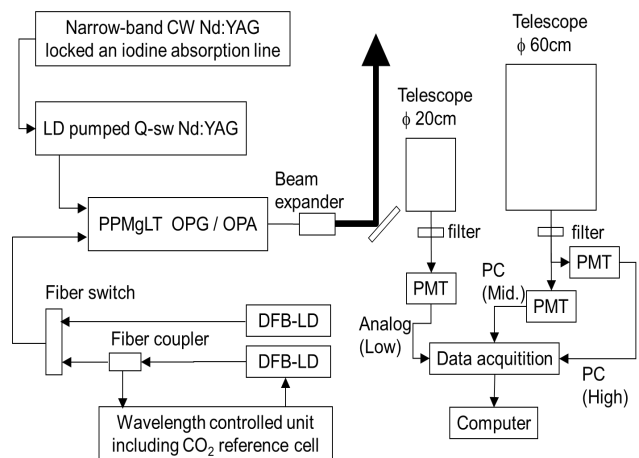


Fig.1 直接検波 CO₂-DIAL のブロック図

3. ダイナミックレンジの拡大

これまで、DIAL による CO₂ 濃度観測において、地表付近から対流圏中部までの観測を目標にシステム設計を行ってきたが、レーザの高出力化、受信望遠鏡径の増大、PMT の S/N の向上などにより、Fig. 2 に示すように、上部対流圏からも十分大きな受信信号を得ることができるようになってきた。

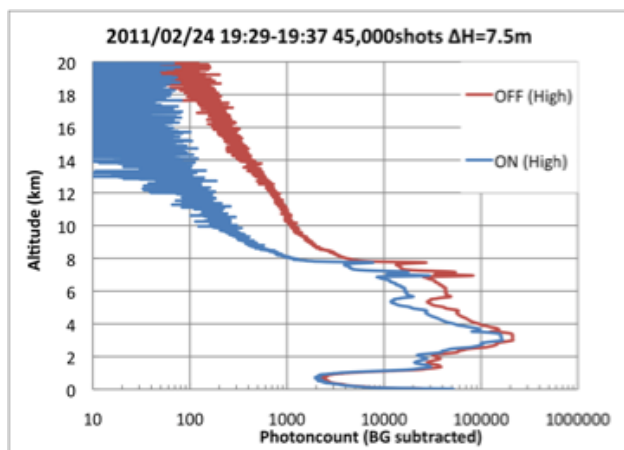


Fig. 2 CO₂-DIAL における受信信号例

しかしながら、下層においては光子計数モードでは、完全に飽和状態となり、アナログモードでの計測が必要になった。したがって、できるだけ地表近辺から対流圏上部までを連続観測するためには、Fig. 1 に示したように、大小の望遠鏡と光子計数モードとアナログモードを融合したシステムの設計が必要になった。

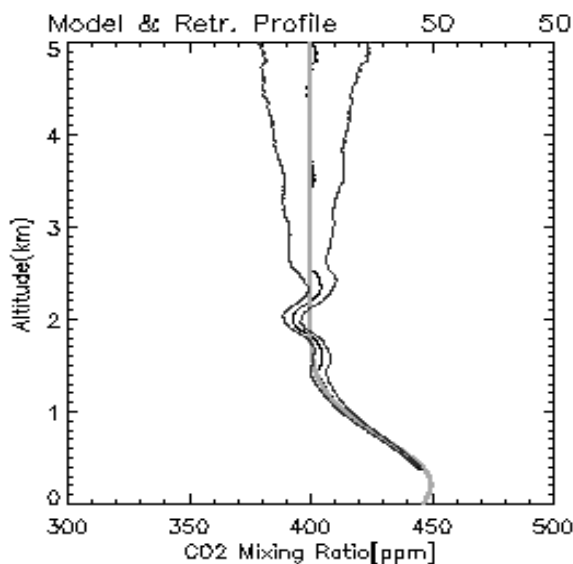


Fig. 3 高度 2km にあるエアロゾル層が 0.1m/s で下降した場合に ON/OFF 波長を 2 秒切替で観測したときの CO₂ 濃度のシミュレーション結果

4. エアロゾルの変動と ON/OFF 切り替え時間

DIAL 観測では観測対象やエアロゾルなどの大気条件の時間変化の影響を避けるため、ON 波長と OFF 波長の切り替え時間は出来るだけ短くすることが望ましい。Fig. 3 に高度 2km にあるエアロゾル層が平均的な下降速度として大きい値である 0.1m/s で下降した場合に、ON 波長と OFF 波長を 2 秒切替で観測したときの CO₂ 濃度のシミュレーション結果を示す。高度 2km 前後で CO₂ 濃度 400ppm のモデルに対して最大 10ppm の誤差が生じていることがわかる。切替時間を 2ms にするとこの誤差は生じない。

我々のシステムは、500Hz で 1shot ごとに ON 波長と OFF 波長を切り替えることに成功しているため、このような誤差は無視できることがわかった。

5. 観測例

Fig. 4 に Fig. 2 に示した夜間に 50cm の望遠鏡で受信したデータを元にして得られた CO₂ 濃度の高度プロファイルを示す。高度方向の平滑化幅は 2400m、時間分解能は 8 分である。高度 9km の対流圏界面までの CO₂ 濃度の鉛直分布測定が可能となった。

観測時間が 8 分程度で、この程度の結果が得られるので、上部対流圏の CO₂ 濃度の変動が小さくないと仮定するならば、受信鏡の大きさをさらに大きくすることや観測時間を長くとることにより、観測精度の向上や観測高度の延長を期待することができる。

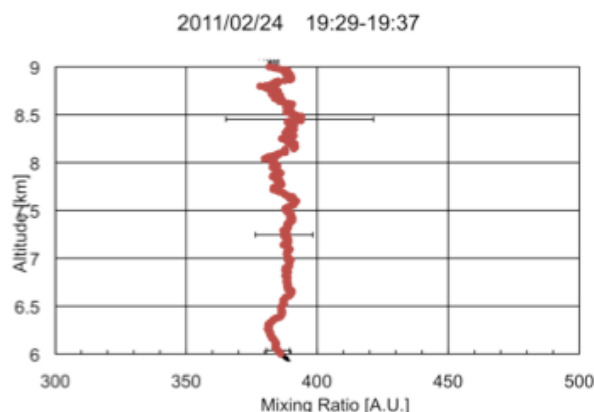


Fig. 4 上部対流圏の CO₂ 鉛直濃度分布観測例

6. まとめ

今回は、地表付近の下層から高度 10km あたりの上部対流圏までの広いダイナミックレンジにわたる CO₂ 濃度分布を観測するために、2 系統の光子計数法と 1 系統のアナログ法の組み合わせを用いた DIAL システムの設計を行い、さらに本システムでは、エアロゾル層の変動と on/off 波長のスイッチング時間に起因する測定誤差が無視できることを報告した。

謝辞 本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」により行われている。

参考文献

D. Sakaizawa et al., Applied Optics, 48(4), 748, 2009